

基于空间资源竞争的三维树木建模方法

杨海泉¹ 王仪丰² 王志强¹ 张志伟¹

(深圳大学计算机与软件学院 广东 深圳 518060)¹

(天津理工大学计算机科学与工程学院 天津 300384)²

摘要 针对自然界中树木种类多、几何形态复杂以及结构差异大等特点,文中探讨了一种基于空间资源竞争的树木建模方法。在一定空间内随机地放置吸引点,根据树节点和吸引点之间的交互过程构建树木三维骨架,采用贝塞尔曲线优化树木骨架,通过圆台建构树木几何模型。利用叶序和阴影传播算法控制叶子在枝干上的分布。与 L-系统和空间殖民算法生成的树木进行对比分析的结果表明该方法绘制的树木真实感强,不仅能有效避开障碍物生长,而且数据量小。

关键词 树木建模,计算机仿真,空间资源竞争,贝塞尔曲线,阴影传播算法

中图分类号 TP391.41 文献标识码 A

3D Tree-modeling Approach Based on Competition over Space Resources

YANG Hai-quan¹ WANG Yi-feng² WANG Zhi-qiang¹ ZHANG Zhi-wei¹

(College of Computer Science and Software Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)¹

(School of Computer Science and Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)²

Abstract For the vast varieties in nature, complexity of geometric shapes and great difference structure of trees, this paper explored a tree-modeling approach based on the competition over space resources. In particular, the attraction points are randomly distributed in a certain space, and then the three-dimensional skeleton of tree is constructed by the reciprocal process between tree nodes and attraction points. The Bezier curve is utilized to optimize the skeleton of tree, and the geometric model of tree is constructed through the round table. The leaf order and shadow propagation algorithms are also used to control the distribution of leaves in the branches. By comparison with the L-system and space colonization algorithm, the experimental results present that the trees drawn by this approach have a strong sense of reality, which not only grow with avoiding obstacles effectively, but also require a small amount of data.

Keywords Treemodeling, Computer simulation, Competition over space resources, Beziercurve, Shadow propagation algorithm

1 引言

树木花草是虚拟场景中普遍存在的景观,能够增强画面沉浸感,目前已应用于许多领域,包括虚拟仿真、植物学、建筑学、计算机动画和影视作品^[1-4]。树木种类的多样性和几何形态的复杂性使得人工构建树木模型费时又费力^[5-8]。

目前国内外学者提出了许多树木建模方法,按照输入数据的不同,主要分为基于图像的建模方法和基于启发式的建模方法。基于图像的建模方法是通过单张或多张图像蕴含的三维信息和先验知识重建树木模型。如 Shlyakhter^[9]使用多张树木图像作为输入,采用提取的树冠作为约束条件,推导出树木的枝干结构,并生成与输入图像相似的三维树木模型;Reche^[10]提出体绘制方法构建树木模型,从一组不同视角的树木图像计算出不同方向的模型网格透视图,再利用广告牌技术进行体绘制;Argudo^[11]通过单张图像得到径向距离图

(Radial Distance Map, RDM)和叶子颜色,结合空间殖民算法生成树木模型,实现了不同层级树木模型的重建。基于启发式的建模方法是通过设置特定的规则模拟树木的生长,Prusinkiewicz等^[12-13]提出 L-系统方法,采用给定的公理和一系列产生式规则,经多次迭代得到植物形态;Runions^[14]利用树木枝干对生长空间资源的竞争进行树木建模;Palubicki等^[15]提出一种基于光和空间资源竞争的树芽生长模型,结合植物内部信号机制模拟树木的三维模型。

基于图像的建模方法生成的树木较真实,但对输入的图像要求高,不易获得满足算法要求的图像且对生成模型的控制有限。基于启发式的建模方法不需要获取真实树木数据,实现相对容易且应用广泛。本文提出一种基于空间资源竞争的树木建模算法,通过放置离散的吸引点表示空间资源,根据树节点与吸引点的交互过程构建树木初始骨架,采用贝塞尔曲线进行拟合,优化并生成新的树木骨架,通过圆台构建枝干

本文受科技部国家科技支撑计划项目(2014BAH28F05)资助。

杨海泉(1994—),男,硕士生,主要研究方向为多媒体信息处理, E-mail: 2160230424@email.szu.edu.com;王志强(1963—),男,硕士生导师,教授,主要研究方向为多媒体信息处理、虚拟现实等, E-mail: wangzq@suz.edu.cn(通信作者)。

几何模型。最后,利用植物叶序和阴影传播算法控制叶子在枝干上的分布。实验结果表明,该方法绘制的树木真实感强,不仅能避开障碍物生长,而且数据量小。

2 树木的组成

树木模型主要由树干、树枝和叶子构成。树干和树枝作为树木的主要组成部分,与叶子一起构建树木的轮廓。理想化的树木骨架是平滑的曲线,所以通常使用广义光滑圆柱体对树木枝干进行建模,然而全局光滑的分支表面需要较高的计算成本和较大的内存资源。因此,将树木视为一种分层组织的模块结构^[16-17],每个单独的树木都是由一系列离散对象组成的集合,如树节点、节间和叶子。树节点为叶子与树枝或树干的交点。同一树枝上的相邻两个树节点之间部分为节间,与植物学中节间的定义类似。叶子依附在树节点或节间上,树木的组成如图 1 所示。

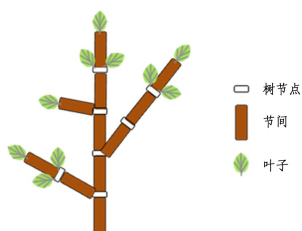


图 1 树木的组成

3 树木建模算法

3.1 空间资源竞争算法

树木生长受到各种因素的影响,如光照、空间资源和重力等。Runions 认为树木生长主要由空间资源决定,提出的空间殖民算法简化了树木生长模型。该算法生成的树木具有一定的真实性,但难以控制树木局部分枝类型,不易生成特定结构的树木模型。针对这些问题,根据真实树木的递归结构,本文设计了一种递归的空间资源竞争算法,通过模拟树木在每个生长周期内对空间资源的竞争来构建树木骨架。

设 $lifespan$ 为生命周期, d_i 为吸引距离, d_k 为吸收距离。在初始空间内放置一个树节点及 N 个随机分布的吸引点。吸引点用于表征可供树节点生长的范围,也是所有树节点共同争夺的空间资源。每个生长周期内树木进行一次树节点与吸引点的交互,包括树节点的生长和吸引点的吸收。

若吸引点与最近树节点 v 的距离小于 d_i ,则生成新树节点 v' 。

$$v' = v + D \frac{\vec{n}}{\|\vec{n}\|}, S(v) \neq \emptyset \quad (1)$$

其中, $S(v)$ 为与树节点 v 距离小于 d_i 的吸引点集合,表示树节点 v 竞争获得的空间资源。 D 为 v 与 v' 的距离, \vec{n} 为单位向量,其方向为树节点 v 指向吸引点 $s \in S(v)$ 单位向量的和。

$$\vec{n} = \sum_{s \in S(v)} \frac{s - v}{\|s - v\|} \quad (2)$$

若吸引点与最近树节点的距离小于 d_k ,则吸引点被吸收。

树木的一个生长周期如图 2 所示。

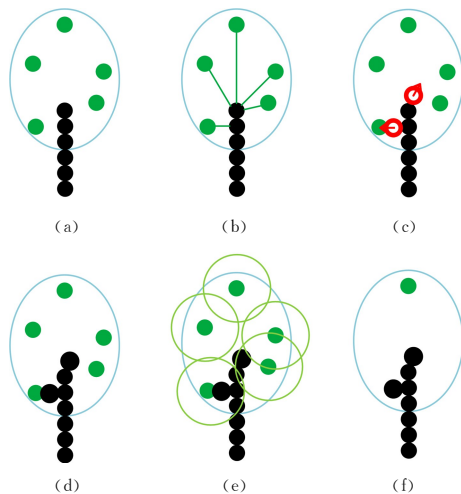


图 2 树木的生长周期(电子版为彩色)

图 2 中黑色圆点表示树节点,绿色圆点表示吸引点。树节点的生长过程如图 2(a)~图 2(c)所示。树节点根据式(1)生成新树节点,图 2(c)红色空心圆点表示新树节点。吸引点的吸收过程如图 2(d)~图 2(f)所示。图 2(e)、图 2(f)表示吸收范围内有树节点的吸引点被吸收的过程。

当所有吸引点被吸收, $lifespan = lifespan - 1$ 。若 $lifespan = 0$,树木初始骨架建构完成,否则随机选择 K 个树节点,在每个选定的树节点周围放置 M 个吸引点,进入下一个树木生长周期。

3.2 枝干几何模型

通过空间资源竞争算法,构建了树木初始骨架。但直接生成的初始骨架比较僵硬,不能很好地模拟树木的弯曲树枝,因此采用贝塞尔曲线^[18]拟合初始骨架,以便更好地模拟树木形态。考虑到高阶贝塞尔曲线会导致计算效率降低,因此使用二阶贝塞尔曲线。

$$B(u) = (1-u)^2 P_0 + 2u(1-u) P_1 + u^2 P_2 \quad (3)$$

其中, $u \in [0, 1]$, u 为位置参数, P_0 为起始点, P_1 为控制点, P_2 为终止点。

由初始树木骨架可以得到连续两个分支段的 3 个树节点坐标 M_0, M_1, M_2 ,如图 3(a)所示。根据这三点的二阶贝塞尔曲线拟合连续分支段,可以得到改进的更加光滑的树木骨架,如图 3(b)所示。

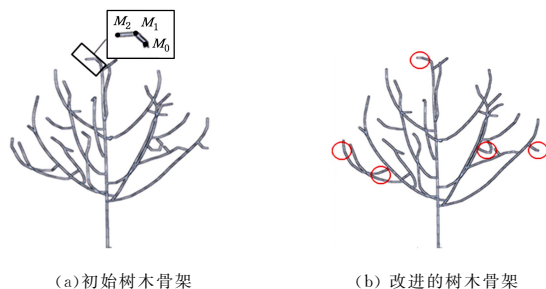


图 3 树木的骨架

利用改进的树木三维骨架可以快速生成枝干几何模型。自然界的树木枝干一般规律是母枝干比子枝干的半径大;同一枝干根部比头部的半径大。因此节间的几何模拟采用圆台。借助 Shinozaki^[19]提出的经验公式计算圆台横截面半径。

$$r^t = r_0^t + r_1^t + \dots + r_n^t, t \in [2, 3] \quad (4)$$

其中, r 表示母节间半径大小, r_0, r_1, \dots, r_n 表示子节间半径大小, 如图 4 所示。

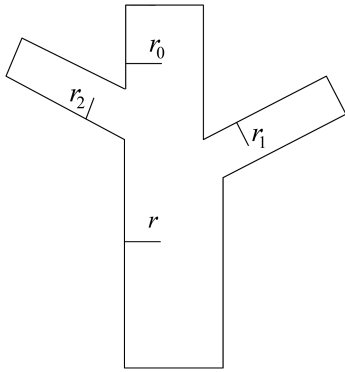


图 4 节间半径的关系

3.3 叶子的分布

为了构建真实感的树木, 合理分布叶子在枝干上的位置至关重要。叶子在枝干上的排列方式在植物学中叫叶序, 常见的叶序有对生叶序、轮生叶序和互生叶序等, 如图 5 所示。

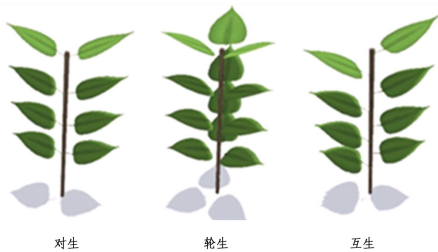


图 5 叶序

根据叶序需要合理地处理叶子在枝干上的位置。由于一棵树上含有大量叶子, 如果只按照叶序放置叶子, 将会浪费计算资源。因此引入阴影传播算法^[20-21]控制叶子数量, 在不影响树木真实性的情况下, 减少树木模型的叶子数据量。通过阴影传播算法可以估算每片叶子的接收光量来决定是否保留叶子, 阴影传播算法的步骤如下。

第 1 步 将空间划分为体素网格, 每个体素 $Voxel_{i,j,k}$ 的阴影值 s 初始化为 0, 其中 i, j, k 代表空间索引值。

第 2 步 每个位于 $Voxel_{i,j,k}$ 的叶子会在叶子下方生成一个受其影响的锥形区域, 如图 6 所示。受影响的体素 $Voxel_{i,j,k}$ 的索引 $(x, y, z) = (i \pm p, j \pm q, k \pm p)$, 其中 $p=0, 1, \dots, p_{max}, q=0, 1, \dots, q_{max}$ 。

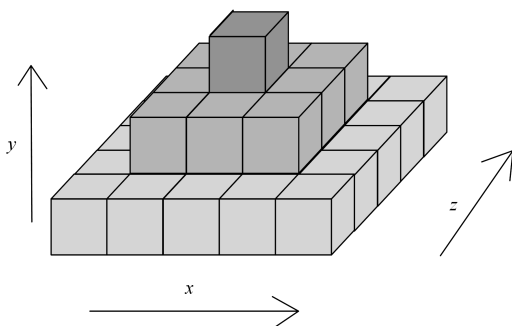


图 6 锥形影响区域

第 3 步 受影响的体素 $Voxel_{i,j,k}$ 的阴影增量 ΔS 为:

$$\Delta S = kb^{-q}, k > 0, b > 1 \quad (5)$$

其中, k 为比例系数, b 是体素光密度值。叶子光量值 Q 为:

$$Q = \max(C - s, 0) \quad (6)$$

其中, C 为没有受到任何遮挡的光量值, s 表示为叶子所在体素 $Voxel_{i,j,k}$ 的阴影值。

第 4 步 对于每片叶子, 若其接收的光量值小于 ϵ , 则表示叶子没有接受到足够的光照, 自然脱落, 反之则保留叶子。

4 实验结果与分析

4.1 仿真实验

本研究实验环境是 Intel Core i7-6700K CPU、24 GB 内存、AMD Radeon R9 380 Series(2GB) 的计算机。空间资源算法可以通过不同的参数设置, 生成不同种类的树木模型, 如表 1 所列。

表 1 不同的参数设置

树木种类	吸引点数量	吸引距离/m	吸收距离/m	生命周期
松树	2870	0.9	0.5	2
小叶榄仁	525	0.8	0.8	3
杉树	1543	1	0.4	3

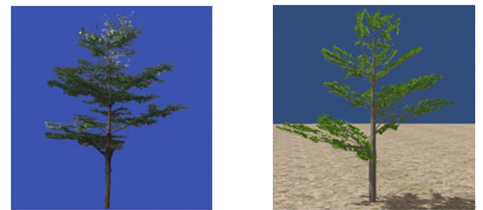
该算法生成的不同树木如图 7—图 9 所示, 与自然界树木相比, 生成的树木模型有着较好的真实感。



(a) 真实的松树

(b) 生成的松树

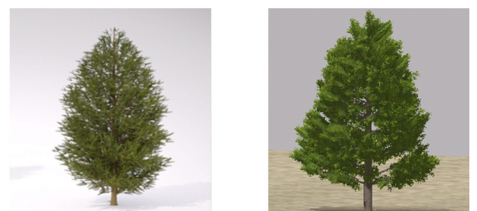
图 7 松树



(a) 真实的小叶榄仁

(b) 生成的小叶榄仁

图 8 小叶榄仁



(a) 真实的杉树

(b) 生成的杉树

图 9 杉树

选取模拟的树木都有特定的分支结构, 因此可证明空间资源竞争算法具有生成有特定分支结构树木的能力。例如松树, 两边枝干相对生长在主枝干两侧, 通过将生命周期划分为两步, 第一个生长周期生成主枝干, 第二个生长周期在生成的主枝干上生成侧枝干, 即可模拟松树的特定分支结构。

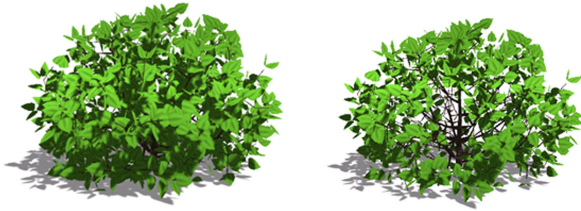
空间资源竞争算法生成的树木形状由代表生长区域的离散吸引点决定, 因此它能模拟树木避开周围障碍物生长的现象, 如图 10 所示。



(a)没有避开障碍生长的树木 (b)避开障碍生长的树木

图 10 三维场景中的树木

空间资源竞争算法在叶子生成过程中使用了阴影传播算法,因此可以合理地控制树木的叶子数量。通过生成同一棵具有不同叶子数量的树木展示算法效果,如图 11 所示。



(a)具有大量叶子的灌木 (b)具有合适叶子的灌木



(c)具有少量叶子的灌木

图 11 不同叶子数量的灌木

4.2 算法比较

利用 L-系统、空间殖民算法和空间资源竞争算法生成橡树进行算法比较。与 L-系统生成的橡树相比,空间殖民算法和空间资源竞争算法生成的橡树模型符合真实树木分支自组织结构的特点^[22],如图 12 所示。



(a)L-系统 (b)空间殖民算法



(c)空间资源竞争算法

图 12 不同算法生成的树木的比较

式,因此如果需要生成不同的树木类型,则需要定义不同的规则,这对植物学知识有一定的要求,如图 12(a)所示。空间殖民算法无法合理地调整树木模型的叶子数量,很难控制局部分支结构,如图 12(b)所示。相比而言,空间资源竞争算法能够灵活地构建不同类型的树木,生成的树木模型能避开障碍物生长,通过参数控制,可以较好地调节叶子数量,减少模型复杂度,图 12(c)所示。

4.3 性能分析

L-系统、空间殖民算法和空间资源竞争算法生成橡树的性能数据如表 2 所列。对比可知,通过空间资源竞争算法绘制的橡树复杂度最低且绘制速度较快,所需的存储空间与空间殖民算法相比减少了 17%,而绘制的时间只增加了 1 s。

表 2 不同方法的效率比较

方法	顶点数量/k	三角面片数量/k	绘制时间/s
L-系统	601.0	635.6	45
空间殖民算法	117.8	147.2	8
空间资源竞争算法	105.2	122.1	9

当模拟空间范围大小为 $300 \times 100 \times 20$ 的场景时,通过增加树木的数量可以比较 L-系统、空间殖民算法和空间资源竞争算法在实际场景中的性能,如图 13 所示。

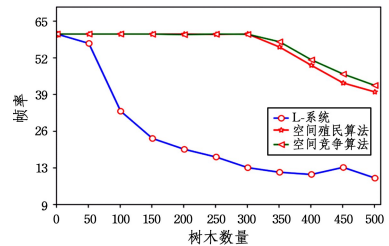


图 13 性能对比

随着树木数量的增加,L-系统的场景帧率较早下降,适用于对真实感要求不高、只需少量树木的虚拟场景。空间殖民算法和空间资源竞争算法性能相近,但空间资源竞争算法能合理地调节树叶数量,因此优于空间殖民算法。空间资源竞争算法生成树木的复杂度随着树木数量的增加而增加,并且由于使用阴影传播算法,减少了叶子数量,节约了计算资源,适用于对场景真实感要求高且需要大量树木的虚拟场景。

结束语 本文基于空间资源竞争构建树木模型,利用叶序和阴影传播算法控制叶子在枝干上的分布,可以快速绘制形态各异的静态三维树木模型。实验结果表明,空间资源竞争算法生成的树木模型不仅能避开障碍物生长且数据量小,适用于需要大量树木且对真实感有较高要求的虚拟场景。在构建树木模型时只考虑对树木生长有影响的主要因素,未将其他因素(如顶端优势、树芽在生长过程中的自然脱落及植物的向性运动等)列入考虑范围。如何更加真实地模拟树木和综合考虑其他植物学因素造成的影响是今后进一步的研究方向。

参考文献

[1] XIE K, YAN F, SHARF A, et al. Tree Modeling with Real Tree-Parts Examples[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2016, 22(12): 2608-2618.
 [2] XU L, MOULD D. Procedural Tree Modeling with Guiding Vectors[J]. Computer Graphics Forum, 2015, 34(7): 47-56.

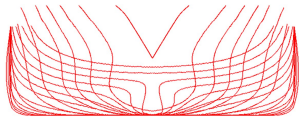


图 11 优化后截面曲线图

图 12 所示的是每条截面曲线最大误差值为 50mm 时,用最少数据点拟合出的船体 B 样条曲面。

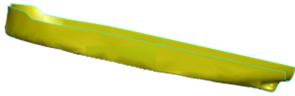


图 12 优化后船体曲面

结束语 本文利用 B 样条曲线和 B 样条曲面理论,反算拟合了船体截面图和曲面图,并对数据点做出了精简处理,减少了拟合船体曲线和曲面所用到的数据点数量,减少了绘制所用的时间,提高了拟合效率。但从绘制出的船体模型可以看出,船底有略微不平整。因此还需调整精度与效率的关系,寻求出一套既保证模型精准又保证拟合效率的方案。

参考文献

[1] 李士才,席平,王亚平,等.从已有二维图样实例重建三维参数化特征模型的应用研究[J].工程图学学报,2000,21(1):36-40.
 [2] 李晋芳,施法中.商品化 CAD 软件中基于二维视图的三维重建模块的设计与实现[J].计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(4):171-175.

[3] 陆国栋,阮建中,江涛,等.基于工程图样的三维重建技术研究与实现[J].计算机辅助设计与图形学学报,1999,11(6):516-520.
 [4] ALDEFELD B. On automatic recognition of 3D structures from 2D representations[J]. Computer-Aided Design, 1983, 15(2): 59-64.
 [5] GHOSH S K, LI Y B, MUNNS A K, et al. Generating solid models from two-dimensional representations [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 54(1/2/3/4): 211-217.
 [6] GU K, TANG Z, SUN J. Reconstruction of 3-D solid objects from orthographic projections[J]. Computer Graphics Forum, 1986, 9(5): 317-323.
 [7] 公茂凯,高国安.由三视图构造三维实体方法的综述[J].计算机研究与发展,1992,29(8):47-52.
 [8] 任宗强.浅谈 AutoCAD 中将既有图纸二维转三维方法和流程[J].智能城市,2018,15(19):32-33.
 [9] 肖轶军,丁明跃,彭嘉雄.基于迭代最近点的 B 样条曲线拟合方法研究[J].中国图像图形学报,2000,5(7):585-588.
 [10] HARTLEY D J, JUDD C J. Parametrization of Bezier-type B-spline curves and surfaces[J]. CAD, 1978, 10(2): 130-134.
 [11] PIEGL L. Modifying the shape of rational B-splines, part1: curves[J]. CAD, 1989, 21(8): 509-518.
 [12] 方建群.双三次曲面插值过程中弦长参数化问题的探讨[J].中国矿业大学学报,1990,(1):71-77.
 [13] 施法中.计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条[M].北京:高等教育出版社,2013:43-46.

(上接第 41 页)

[3] ZHANG X, BAO G, MENG W, et al. Tree Branch Level of Detail Models for Forest Navigation[C]//Computer Graphics Forum. 2017.
 [4] KRATT J, SPICKER M, GUAYAQUIL A, et al. Woodification: User-Controlled Cambial Growth Modeling[C]//Computer Graphics Forum. 2015:361-372.
 [5] ZHANG X, ZHANG X, ZHANG X, et al. Realistic procedural plant modeling guided by 3D point cloud [C] // ACM SIGGRAPH. ACM, 2017: 85.
 [6] WANG G, LAGA H, XIE N, et al. The Shape Space of 3D Botanical Tree Models[J]. Acm Transactions on Graphics, 2018, 37(1): 1-18.
 [7] 杨垠晖,王锐.树木的真实感建模与绘制综述[J].计算机辅助设计与图形学学报,2018(2):191-216.
 [8] MEI J, WU S, WU S, et al. 3D tree modeling from incomplete point clouds via optimization and L1-MST [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2017, 31(5): 999-1021.
 [9] SHLYAKHTER I, ROZENOER M, DORSEY J, et al. Reconstructing 3D Tree Models from Instrumented Photographs[J]. Computer Graphics & Applications, 2001, 21(3): 53-61.
 [10] RECHEMARTINEZ A, MARTIN I, DRETTAKIS G. Volumetric reconstruction and interactive rendering of trees from photographs[J]. Acm Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 720-727.
 [11] ARGUDO O, CHICA A, ANDUJAR C. Single-picture reconstruction and rendering of trees for plausible vegetation synthesis[M]. Pergamon Press, Inc. 2016.
 [12] PRUSINKIEWICZ P, LINDENMAYER A. The algorithmic beauty of plants[M]. New York: Springer-Verlag, 1990.

[13] MÉCH R. Visual models of plants interacting with their environment[C]//Proc of Siggraph. ACM, 1996:397-410.
 [14] RUNIONS A, LANE B, PRUSINKIEWICZ P. Modeling Trees with a Space Colonization Algorithm[C]//Eurographics Workshop on Natural Phenomena(Nph 2007). Prague, Czech Republic, DBLP, 2007:63-70.
 [15] PALUBICKI W, HOREL K, LONGAY S, et al. Self-organizing tree models for image synthesis[C]//ACM SIGGRAPH 2009. ACM, 2009:1-10.
 [16] BARTHÉLÉMY D, CARAGLIO Y. Plant architecture: a dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny[J]. Ann Bot, 2007, 99(3): 375-407.
 [17] REFFYE P D, EDELIN C, JAEGER M, et al. Plant models faithful to botanical structure and development [J]. AcmSiggraph Computer Graphics, 1988, 22(4): 151-158.
 [18] BASHIR U, ALI J M. Rational cubic trigonometric Bézier curve with two shape parameters[J]. Computational & Applied Mathematics, 2016, 35(1): 1-16.
 [19] SHINOZAKI K, YODA K, HOZUMI K, et al. A Quantitative analysis of plant form-the pipe model theory: ii. further evidence of the theory and its application in forest ecology[J]. Japanese Journal of Ecology, 1964, 14: 97-105.
 [20] BORNHOFEN S, LATTAUD C. Competition and evolution in virtual plant communities: a new modeling approach[J]. Natural Computing, 2009, 8(2): 349-385.
 [21] PALUBICKI W. Fuzzy Plant Modeling with OpenGL-Novel Approaches in Simulating Phototropism and Environmental Conditions[M]. VDM Verlag, 2007.
 [22] SACHS T. Self-organization of tree form a model for complex social systems[J]. Journal of Theoretical Biology, 2004, 230(2): 197-202.